

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ДУТЬЯ ДОМЕННЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

А.А. Буткарев<sup>1</sup>, А.П. Буткарев<sup>1</sup>, А.Г. Птичников<sup>2</sup>, В.П. Туманов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической  
теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»)  
(г. Екатеринбург, Россия)

<sup>2</sup>ОАО «Челябинский металлургический комбинат»  
(г. Челябинск, Россия)

*Результаты теплотехнического обследования работы блока доменных воздуховодов доменной печи № 1 объемом 2038 м<sup>3</sup> ОАО «Челябинский металлургический комбинат» подтвердили возможность увеличения температуры горячего дутья не менее чем на 30–40 °С за счет внедрения подсистемы оптимального управления ВНИИМТ. Годовой экономический эффект только за счет экономии кокса достигает 75 млн руб.*

**Ключевые слова:** доменные воздуховоды, система оптимального управления, математическая модель, алгоритм, оптимизация, теплотехническое обследование.

*The results of the heat research of the hot blast stoves of the blast furnace number 1, the volume of 2038 m<sup>3</sup> of Chelyabinsk Metallurgical Plant confirmed the possibility of increasing the temperature of the hot blast of not less than by 30–40 °C due to the introduction of VNIIMT optimal control subsystem. The annual economic effect only by saving coke reaches 75 million RUB.*

**Keywords:** hot blast stoves, optimal control system, mathematical model, algorithm, optimization, heat research.

Увеличение температуры нагрева дутья в доменном производстве является одним из эффективных путей сокращения расхода дорогостоящего кокса и улучшения других технико-экономических показателей работы доменных печей. Оценить эффективность работы блока доменных воздуховодов, а также определить резервы увеличения температуры горячего дутья можно на основе его теплотехнического обследования. При этом известно, что наряду с совершенствованием конструкции воздуховодов (ВН) и насадки, требующей сравнительно высоких капитальных затрат, существенным резервом увеличения температуры горячего дутья и повышения эффективности работы воздуховодов является создание современных высокоэффективных автоматизированных систем управления с решением задач оптимального управления процессом получения горячего дутья на основе детерминированных математических моделей.

На основе опыта математического моделирования и разработки оптимальных конструкций доменных воздуховодов в институте ОАО «ВНИИМТ» разработана подсистема оптимального управления – верхний

имитационно-оптимизирующий уровень доменных воздухонагревателей (ВАОУ-ВН), позволяющая обеспечить увеличение температуры горячего дутья на 30–40 °С.

При разработке ВАОУ-ВН важнейшими принципами являются:

– функционирование в системе управления обобщенной прогнозирующей детерминированной математической модели получения горячего дутья в доменных воздухонагревателях различных конструкций;

– автоматическая идентификация параметров модели;

– при формировании критериев и постановок задач оптимизации и создании соответствующей модели управления исходили из важнейших для процесса подготовки горячего дутья показателей – температура горячего дутья и расход энергоресурсов, определяющих показатели работы доменного цеха.

*Обобщенная прогнозирующая детерминированная математическая модель*

Прогнозирующая детерминированная математическая модель строится на основе законов физики процессов, происходящих в газовый и дутьевой периоды работы воздухонагревателей и включает основные уравнения теплообмена и аэродинамики воздухонагревателей и усилена комплексным дополнением прогнозирующих элементов модели (расхода газа, температуры горячего дутья и пр.), что позволяет:

- с высокой точностью, быстро и надежно определять значения параметров недоступных для прямого измерения («косвенные измерения»);

- прогнозировать значения показателей (например, температура горячего дутья, удельный расход газа) при изменении значений управляющих параметров.

Обобщенная прогнозирующая детерминированная математическая модель включает в себя следующие компоненты, настраиваемые на конкретные характеристики блока доменных воздухонагревателей (используемый тип и марка насадочного кирпича по высоте доменного ВН насадки и ее отдельные элементы и др.) [1]:

- модель теплообмена воздухонагревателей в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных;

- модель аэродинамики воздухонагревателей;

- модель прогнозирования расхода газа, построенную на основе уравнений теплового и материального балансов процесса горения, параметрически настраиваемую на конкретный вид топлива (доменный, коксовый, природный или смешанный газ) с учетом предельных параметров работы горелочных устройств.

*Алгоритмы идентификации параметров модели*

Параметрами модели, подлежащими идентификации (поиск реальных коэффициентов уравнений модели), являются наиболее сложные трудно определяемые и часто изменяющиеся величины (коэффициент теплоотдачи, поверхность теплообмена, коэффициенты газодинамического сопротивления, теплофизические характеристики насадки воздухонагревателя). Алгоритмы идентификации построены таким образом, что позволяют в реальном масштабе времени корректировать значения параметров уравнений модели при меняющейся технологической ситуации на объекте управления.

Тем самым достигается высокая точность прогнозирования показателей и максимальная адекватность модели реальному процессу, что создает условия для эффективного решения задач оптимального управления.

#### *Алгоритмы оптимизации*

Алгоритмы позволяют решить следующие важнейшие задачи оптимального управления технологическим процессом при ограничениях на максимальные и минимальные температуры купола, стыков зон насадки, поднасадочного устройства, скорости нагрева и охлаждения, расходы газа и воздуха на горелочные устройства, времена газового и дутьевого периодов по основному критерию, диктуемому доменным производством:

- максимум температуры горячего дутья;
- минимум затрат на получение дутья заданных параметров;
- максимум экономического эффекта с учетом затрат на нагрев дутья и выгод от повышения температуры дутья.

Это позволяет обеспечить необходимые параметры горячего дутья, низкое энергопотребление и долговечность работы оборудования.

Разработанные алгоритмы реализуются на основе прогнозирующей детерминированной математической модели и позволяют в реальном масштабе времени, учитывая текущую технологическую ситуацию на объекте управления, определять такие значения управляющих параметров, при которых достигается максимум температуры горячего дутья или максимум экономического эффекта при технологических ограничениях на значения управляющих параметров.

ВАОУ-ВН функционирует следующим образом (рис. 1).



Рис. 1. Структура ВАОУ-ВН

Измеряемые значения параметров технологического процесса подаются в прогнозирующую детерминированную математическую модель. Параметры модели постоянно корректируются алгоритмом идентификации. Такая корректировка осуществляется путем минимизации отклонений величин показателей, рассчитанных по модели и соответствующих измеренных величин, в целях обеспечения высокой точности прогнозирования показателей и максимальной адекватности модели реальному процессу.

Адекватная процессу математическая модель рассчитывает и выдает оператору значения параметров процесса, не доступных для прямого измерения (например, температурные поля в насадке, КПД воздухонагревателя, доля вредных перетоков и пр.). Это так называемые «косвенные измерения», которые позволяют оператору более эффективно управлять технологическим процессом.

С использованием алгоритма оптимизации и обращением к математической модели рассчитываются в режиме реального времени оптимальные температурно-временные режимы работы ВН в соответствии с заданным критерием оптимизации (максимум температуры горячего дутья), которые, поступая в контуры регулирования, автоматически воздействуют на процесс, оптимизируя работу блока воздухонагревателей (режим работы on-line), либо выдаются в качестве информации (совета) оператору (режим работы off-line).

Далее рассмотрены основные резервы увеличения горячего дутья за счет внедрения ВИОУ-ВН.

Из практики известно, что технологический процесс получения горячего дутья характеризуется большими колебаниями калорийности доменного газа (до 40 %), различным износом и повреждением воздухонагревателей, (включая «короткие замыкания», оплавления и засорение насадки и пр.), сезонными колебаниями температуры воздуха на горение и температуры холодного дутья, влиянием режимов работы воздухонагревателей друг на друга и пр. Это приводит к неполному сгоранию газа и его перерасходу, пониженной температуре купола в газовый период, большим колебаниям максимальных температур в поднасадочном пространстве к концу газового периода и др. В результате блок доменных воздухонагревателей имеет пониженную температуру горячего дутья, а доменный процесс – перерасход дорогостоящего кокса. Несмотря на значительное количество работ, выполненных в данном направлении, в том числе и в научно-исследовательском институте металлургической теплотехники ОАО «ВНИИМТ», исследование и анализ влияния основных возмущающих факторов на температуру горячего дутья и экономическую эффективность процесса до настоящего времени изучен недостаточно полно.

Цель работы – промышленное теплотехническое обследование блока доменных воздухонагревателей с определением и обоснованием резервов увеличения температуры горячего дутья при внедрении ВИОУ-ВН на примере блока воздухонагревателей доменной печи (ДП) № 1 ОАО «Челябинский металлургический комбинат».

#### *Характеристика объекта*

Воздухонагреватели доменной печи № 1 объемом 2038 м<sup>3</sup> выполнены с внутренними камерами горения, с применением в высокотемпературных зонах диносовых (ДВ) и мулитокорундовых огнеупоров МКВ-72.

Блок содержит 4 одинаковых (по проекту) воздухонагревателей, работающих в попарно-параллельном режиме, когда на дутье одновременно находятся 2 воздухонагревателя, а периоды дутья смещены друг относительно друга на половину периода дутья. Нормативное время газового и воздушного периодов – по 2 ч, продолжительность полного периода – 4 ч. Время перекидки клапанов от 7 до 10 мин.

Для отопления блока воздухонагревателей используют только очищенный доменный газ следующего усредненного химического состава: CO 20–24 %; CO<sub>2</sub> 17–20 %; H<sub>2</sub> 7–9 %; CH<sub>4</sub> 0,4 %. Природный газ не добавляют, регулятора калорийности нет. Давление доменного газа перед ВН стабилизируется регулятором на уровне 550 даПа.

Подачу окислителя (атмосферный воздух) осуществляют индивидуально на каждый воздухонагреватель вентилятором Д-60/310 с номинальной производительностью 60 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

При проведении теплотехнического обследования и анализа работы блока ВН ДП № 1 использованы как результаты инструментальных промышленных измерений, так и другие информационные материалы:

- исходные данные по конструктивным параметрам блока ВН ДП № 1;
- режимные параметры (показания КИП в период с 17 по 27.06.2010 г.);
- результаты работ ОАО «ВНИИМТ», выполненных ранее;
- результаты инструментальных замеров переносными приборами, выполненные специалистами ОАО «ВНИИМТ» в июле 2010 г. совместно со специалистами комбината;
- программное обеспечение ВИОУ-ВН, разработанное на основе математических моделей ОАО «ВНИИМТ».

#### *Колебания калорийности доменного газа*

Основным возмущением при работе воздухонагревателей в газовый период (период нагрева), снижающим в конечном итоге температуру горячего дутья, являются колебания химического состава и соответственно теплотворной способности доменного газа.

Так, например, по результатам технологических замеров и исследований химического состава и теплотворной способности доменного газа, выполненных сотрудниками ВНИИМТ в 1981 г. при исследовании ДП № 1 ОАО «Челябинский металлургический комбинат» с использованием переносных приборов установлено, что теплотворная способность доменного газа ( $Q_n^p$ ) колеблется в пределах  $3791 \div 4300$  кДж/нм<sup>3</sup> (13,4 %). Численный эксперимент, выполненный на основе этих данных, показывает, что, при условии поддержания постоянного (оптимального с точки зрения сгорания доменного газа) коэффициента избытка воздуха горения ( $\alpha = 1,05$ ), приводит к необходимости изменения соотношения «газ–воздух» в пределах 0,77–0,89. То есть для поддержания максимальной температуры купола необходимо соотношение «газ–воздух» оперативно корректировать в диапазоне 14,5 %. В случае отсутствия корректировки соотношения «газ–воздух» температура купола в газовый период может быть ниже максимально возможной на 65 °С.

В период проведения авторами исследований (июнь–июль 2010 г.) калорийность изменялась еще в более широком диапазоне: 2954–4261 (44 %) при средней 3586 кДж/нм<sup>3</sup> (рис. 2). В этом случае для поддержания максимальной температуры необходимо корректировать соотношение «газ–воздух» в

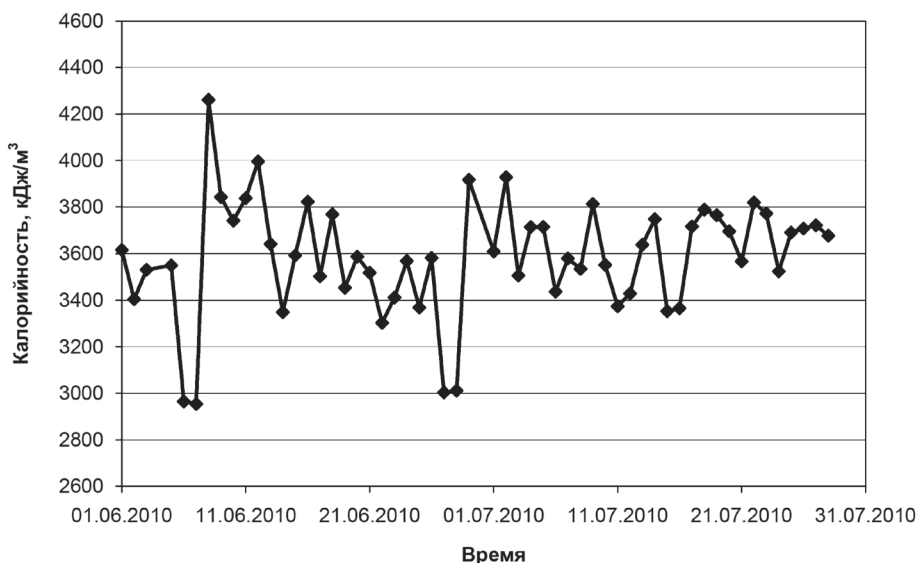


Рис. 2. Колебания калорийности доменного газа

еще более широком диапазоне: от 0,6 (при минимальной калорийности газа) до 0,87 (при максимальной калорийности газа), т.е. в диапазоне 45 %, что соответствует изменению температуры продуктов сгорания (при оптимальном коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,05$ ) в диапазоне 1212–1459 °С, а при средней калорийности (химическом составе) – 1341 °С. Это хорошо согласуется с измеренной стационарными КИП усредненной по воздухонагревателям блока максимальной температурой купола в течение суток с 17–27.06.2010 г. 1338 °С.

Результаты обследования показали, что в настоящее время измерение расхода воздуха горения на ВН не производится, а регулирование соотношения «газ–воздух» ведут вручную по температуре купола, добиваясь ее максимального значения. Однако такой способ регулирования отличается большой инерционностью и запаздыванием во времени (за счет инерционности термопары, установленной на куполе), не учитывает текущее тепловое состояние воздухонагревателя, от которого также зависят ее показания, и, зачастую, не обеспечивает необходимое качество регулирования. Особенно сложно обеспечить максимальную температуру купола при необходимости изменения расхода продуктов сгорания через воздухонагреватель, так как в этом случае необходимо в ручном (дистанционном) режиме управления пропорционально изменять расходы как доменного газа, так и воздуха горения, который оценивают по опытной характеристике «степень открытия направляющего аппарата (НА) – расход» и также не эффективен вследствие наличия люфтов в исполнительном механизме направляющего аппарата. И все это в условиях изменяющихся аэродинамических характеристик воздухонагревателей как в краткосрочном периоде (2–4 ч, связанных с их прогревом, так и в долгосрочной перспективе в связи с засором насадки, ее оплавлением, усадкой (крипом), образованием коротких замыканий пр.).



Анализ показаний стационарных КИП показывает, что к концу газового периода в связи с прогреванием насадки и увеличением ее аэродинамического сопротивления расход доменного газа снижается на 4–6 % при одном и том же положении газового дросселя. В связи с разными аэродинамическими характеристиками трактов ВН по газу и по воздуху, расход воздуха снижается не пропорционально расходу газа, и соответственно, изменяется коэффициент избытка воздуха, что дополнительно приводит к снижению конечной температуры купола.

Инструментальные замеры, выполненные с помощью переносных приборов (термопара ХА, термометр, трубка ВТИ и дифференциальный манометр) (табл. 1) показали, что в момент измерения сжигание доменного газа происходило при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,18–1,19$ , что соответствует соотношению расходов «газ–воздух» 0,86. Сжигание доменного газа с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,05$  позволило бы повысить максимальную температуру купола в газовый период ориентировочно на 55 °С.

Одним из следствий отмеченных колебаний калорийности доменного газа и неоптимального соотношения «газ–воздух» (погрешности в управлении процессом горения топлива) являются колебания максимальной температуры купола в конце газового периода, которые составляют по различным воздухонагревателям от 45 до 56 °С (табл. 2, рис. 3). Средняя температура в конце газового периода по четырем ВН блока составила 1327 °С.

Выравнивание температуры купола в конце газового периода и уменьшение диапазона ее колебаний от цикла к циклу позволит увеличить температуру горячего дутья.

Таблица 1

**Результаты инструментальных замеров с помощью переносных приборов**

№ ВН	Дата, время	Температура воздуха горения, °С	Давление перед горелкой, мм вод. ст.	Расход, нм³/ч		Соотношение «газ–воздух»
				воздуха	газа <sup>1)</sup>	
1	08.07.2010 г. 14:30	31	240	47 396	55 000	0,8618
3	08.07.2010 г. 14:30	31	200	51 257	59 700	0,8586

*Примечание.* По показаниям стационарных КИП.

Таблица 2

**Температура купола в конце газового периода**

Параметр	ВН-1Б	ВН-1	ВН-2	ВН-3	Среднее по блоку
Минимум, °С	1303	1293	1289	1298	1296
Максимум, °С	1348	1349	1345	1353	1349
Средняя, °С	1329	1325	1323	1329	1327
Диапазон колебаний, °С (разница макс.-мин.)	45	56	56	54	53
Температура ниже 1310 °С, раз	0	4	5	4	

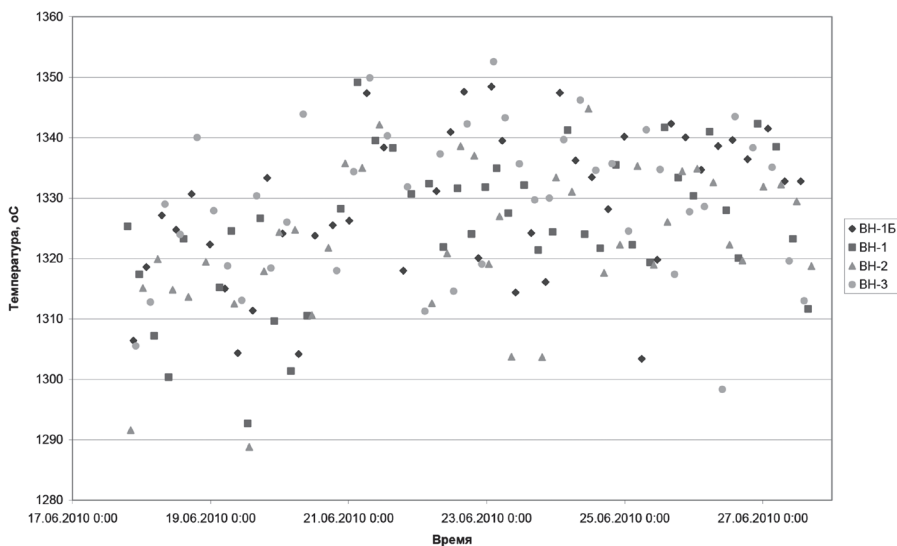


Рис. 3. Температура купола в конце газового периода

Попарно-параллельный режим, когда одновременно в газовом режиме находятся два воздухонагревателя, позволяет оценить разницу в температурах купола, которая вызвана различным соотношением «газ–воздух» двух одновременно работающих воздухонагревателей и соответственно неоптимальным избытком воздуха горения, необходимым для сжигания доменного газа текущего химического состава. Например, на рис. 4 видно, что 18.06.2010 в 14:40 разница температур купола ВН1 и ВН2 в газовый

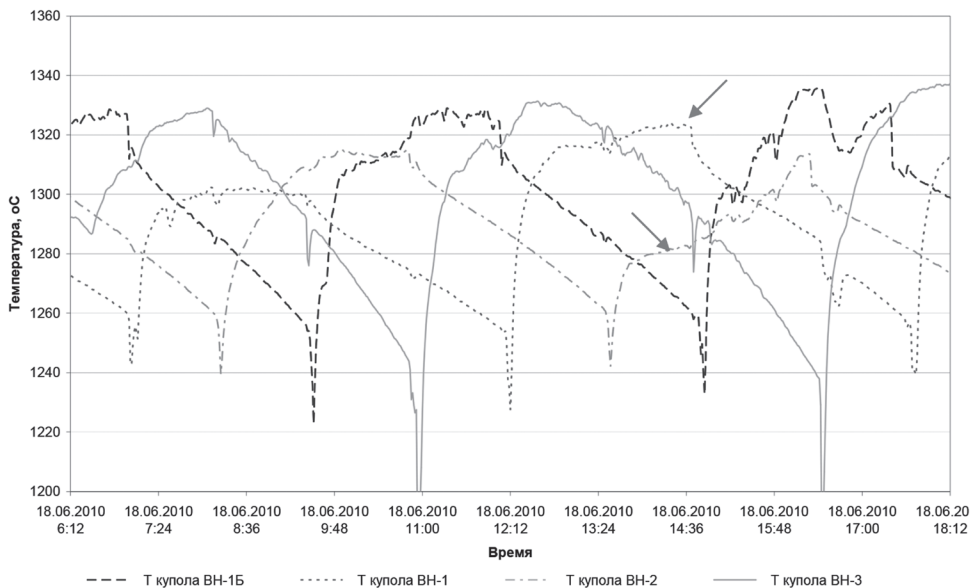


Рис. 4. Температура купола ВН



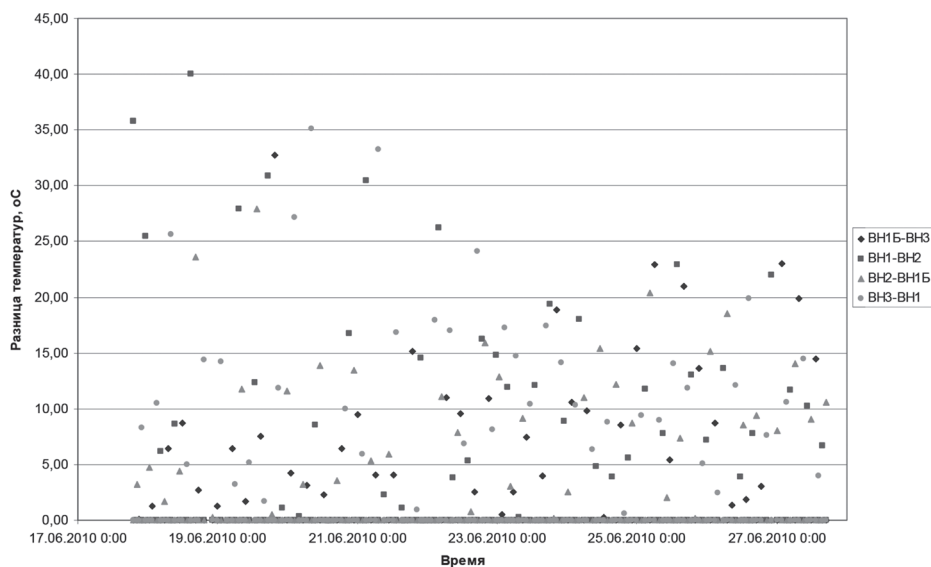


Рис. 5. Разница температур купола двух ВН, работающих в газовом режиме (в конце газового периода одного из них) при различных сочетаниях

период достигала 40 °С, что является свидетельством разного соотношения «газ–воздух» на данных ВН. В целом разница температур купола в конце газового периода попарно работающих ВН представлена на рис. 5 и в табл. 3.

Таким образом, большие колебания калорийности доменного газа (до 44 %) требуют непрерывной корректировки соотношения «газ–воздух» в целях поддержания максимальной температуры купола. Такая автоматическая корректировка возможна в случае реализации эффективной АСУ ТП с внедрением ВИОУ-ВН с автоматическим определением оптимального по максимальной температуре купола соотношения «газ–воздух» и его автоматического поддержания. При этом в среднем увеличение температуры купола составит не менее 11 °С, что приведет к увеличению температуры горячего дутья на 9,14 °С.

Таким образом, за счет решения задачи максимизации температуры горения топлива, температуру купола в газовый период можно увеличить на 30–40 °С, что эквивалентно увеличению температуры горячего дутья на 25–33 °С.

Таблица 3

Разница температур купола двух ВН, работающих в газовом режиме

Параметр	ВН1Б-ВН3	ВН1-ВН2	ВН2-ВН1Б	ВН3-ВН1	Среднее
Минимальная, °С	0	0	0	1	0
Максимальная, °С	33	40	28	35	34
Средняя, °С	8	13	9	12	11
Диапазон колебаний, °С (разница макс.-мин.)	33	40	28	35	34
Разница температур больше 20 °С, раз	4	9	3	5	

### Анализ максимальной температуры в поднасадочном пространстве

Существенным резервом увеличения температуры горячего дутья является максимальный прогрев доменного воздухонагревателя. Максимальная температура газов в поднасадочном пространстве, достигаемая в конце газового периода, за временной интервал с 17.06.2010 по 27.06.2010 г. по различным ВН изменялась в диапазоне от 307 до 425 °С (рис. 6). Максимальные, минимальные и средние значения, а также разница между максимальным

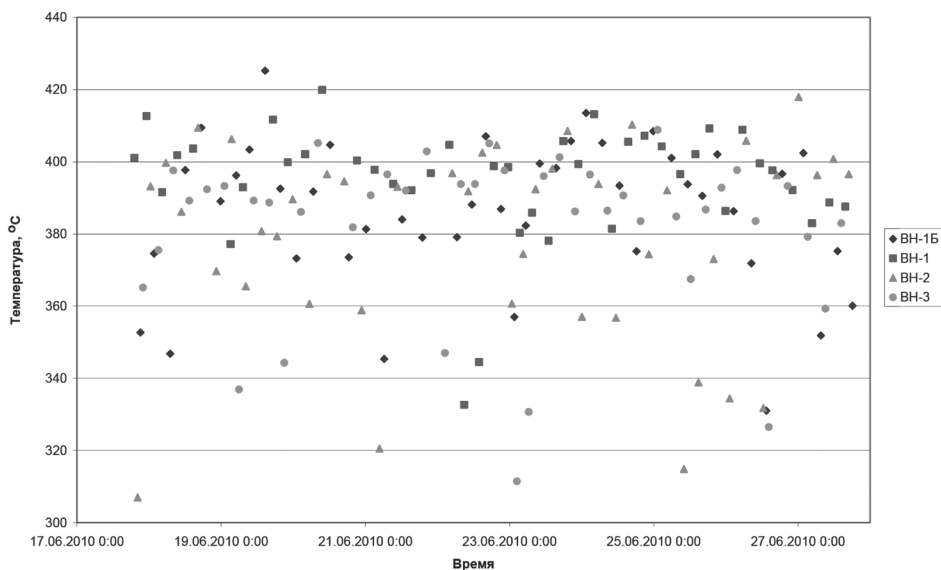


Рис. 6. Температура отходящих газов в поднасадочном пространстве в конце газового периода

и минимальным значением представлены в табл. 5. Работа с пониженными температурами в поднасадочном пространстве (менее предельной температуры 400 °С) приводит к снижению температуры дутья. Превышение же предельной температуры 400 °С недопустимо, так как приводит к снижению срока службы воздухонагревателя.

Таблица 4

Температура в поднасадочном пространстве по ВН (максимальная за цикл)

Параметр	ВН-1Б	ВН-1	ВН-2	ВН-3	Среднее по блоку
Минимум, °С	331	333	307	311	321
Максимум, °С	425	420	418	409	418
Средняя, °С	386	395	380	382	386
Диапазон колебаний, °С (разница макс.-мин.)	94	87	111	97	97
Средняя температура, если исключить температуры >400 °С как недопустимые, °С	378	387	373	379	379
Температура ниже 350 °С, раз	3	2	6	6	

Численные эксперименты, выполненные с использованием математической модели ВНИИМТ для ДП № 1 ОАО «Челябинский металлургический комбинат» показывают, что работа при максимальной температуре в поднасадочном пространстве 400 °С против 380 °С позволит увеличить температуру дутья на 11 °С.

Отметим, что за период с 17.06.2010 по 27.06.2010 г. наиболее часто работа с температурой отходящего дыма к концу газового периода ниже 350 °С наблюдалась у ВН № 2 и 3–6 раз, что связано с недостаточным уровнем автоматизации и, возможно, их высоким аэродинамическим сопротивлением и недостаточной тепловой мощностью горелочных устройств.

Использование ВИОУ-ВН позволяет снизить диапазон колебаний температуры в поднасадочном пространстве и увеличить температуру горячего дутья.

Это достигается за счет непрерывного (в режиме on-line) определения необходимого количества продуктов сгорания в газовый период, которые необходимо подавать в насадку ВН для того, чтобы к концу газового периода обеспечить предельную температуру 400 °С в поднасадочном пространстве с учетом текущей производственной ситуации и состояния конкретного ВН и блока в целом.

В настоящее же время расход газа изменяют ступенчато. Анализ показаний стационарных КИП показывает, что в зависимости от скорости прогрева насадки, которую контролируют по температуре в поднасадочном пространстве, оператор принимает решение по изменению расхода газа и воздуха и, соответственно, продуктов сгорания, фильтруемых через насадку. В частности были зафиксированы следующие характерные изменения расхода газа: в случае недогрева насадки – повышающаяся ступенька с 39 тыс. м<sup>3</sup>/ч до 60 тыс. м<sup>3</sup>/ч (на 50 %); в случае перегрева насадки – понижающаяся ступенька с 50 тыс. м<sup>3</sup>/ч до 40 тыс. м<sup>3</sup>/ч (на 20 %); сначала – повышение расхода, потом понижение; сначала – понижение расхода, потом повышение с 53 тыс. м<sup>3</sup>/ч до 40 тыс. м<sup>3</sup>/ч, а затем вновь увеличение до 53 тыс. м<sup>3</sup>/ч (на 25 %).

*Анализ температур купола в конце дутьевого периода* (рис. 7, табл. 5) показал, что ее колебания в течение 17.06.2010–27.06.2010 г. по различным ВН составляют от 1224 до 1294 °С. При этом отмечаются более низкая минимальная температура по ВН-3 1224 °С, против 1237–1240 °С. ВН-3 также имеет наибольшую из максимальных температур – 1294 °С против 1280–1292 °С по другим ВН. Также за рассматриваемый период времени температура купола у ВН-3 опускалась ниже 1240 °С 8 раз, при этом у ВН-1 – 1 раз, а у ВН-1Б и ВН-2 не опускалась ни разу.

Таким образом, ВН-3 имеет на 5–15 °С более низкую температуру к концу дутьевого периода (1253 °С против 1258–1268 °С), что может быть связано как с меньшей эффективной поверхностью нагрева, меньшим количеством тепла, запасенного в газовый период, большим количеством дутья, проходящего через ВН-3 при попарно-параллельной работе с ВН-1 и ВН-1Б, а также другими факторами.

Установка расходомеров холодного дутья, поступающего на каждый ВН, позволит более эффективно проводить диагностику их состояния при работе в попарно-параллельном режиме, а установка устройств, регулирующих

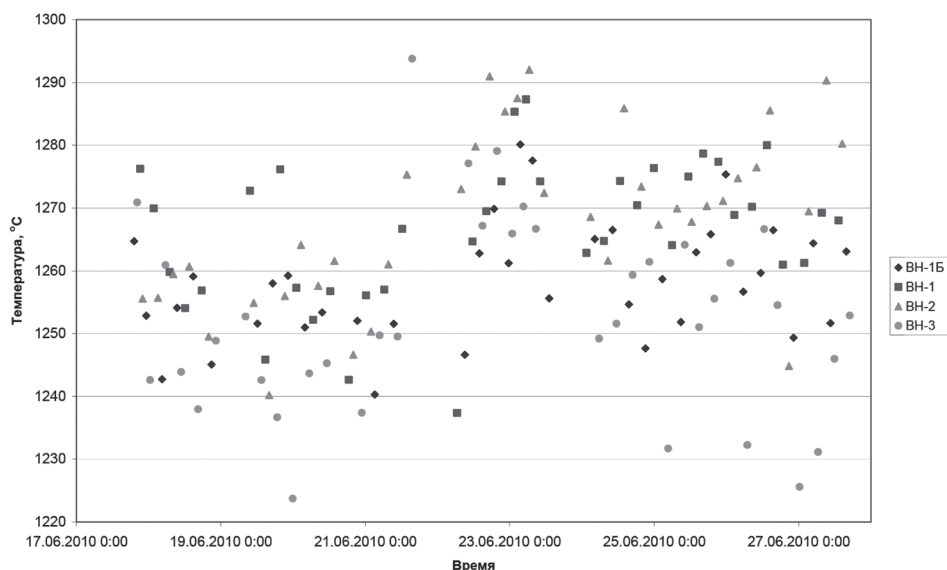


Рис. 7. Температура купола в конце дутьевого периода (минимальная)

количество дутья на каждый ВН индивидуально позволит более эффективно управлять температурой горячего дутья за счет оптимального перераспределения дутья между холодным (ранее вставшим на дутье) и горячим (позже вставшим на дутье) воздухонагревателями.

Таблица 5

Температура купола в конце дутьевого периода

Параметр	ВН-1Б	ВН-1	ВН-2	ВН-3	Среднее по блоку
Минимальная, °С	1240	1237	1240	1224	1235
Максимальная, °С	1280	1287	1292	1294	1288
Средняя, °С	1258	1266	1268	1253	1261
Диапазон колебаний, °С (разница макс.-мин.)	39,8	49,9	51,8	70,1	52,9
Температура ниже 1240 °С, раз	0	1	0	8	

Отметим, что наибольшая скорость снижения температуры купола в период дутья наблюдается у ВН № 3 – 0,46 °С/мин, против 0,36 °С/мин у ВН № 1Б, и 0,31 °С/мин – у ВН 2 и 3 (табл. 6, рис. 8). Причем среднее время работы на дутье ВН близко 150–157 мин, хотя разница между минимальным и максимальным временем у отдельных ВН достигает 134 мин (см. ВН № 1). Максимальное падение температуры купола за период дутья также наблюдается у ВН № 3 – 106 °С, против 74–83 °С у других ВН блока. При этом среднее падение температуры составляет у ВН № 3 – 70 °С, против 56, 48, 47 °С у ВН-1Б, ВН-1, ВН-2 соответственно).

Таблица 6

## Характеристики периода дутья

Параметр	Разница температур купола в начале и в конце периода дутья, °С	Время периода дутья, мин	Скорость падения температуры купола за период дутья, °С/мин
ВН № 1Б			
Минимальная	41	106	0,25
Максимальная	83	206	0,47
Средняя	56	157	0,36
Диапазон колебаний (разница макс.-мин.)	43	100	0,23
ВН № 1			
Минимальная	28	74	0,23
Максимальная	75	208	0,41
Средняя	48	153	0,31
Диапазон колебаний (разница макс.-мин.)	48	134	0,18
ВН № 2			
Минимальная	25	94	0,20
Максимальная	74	181	0,41
Средняя	47	152	0,31
Диапазон колебаний (разница макс.-мин.)	49	87	0,22
ВН № 3			
Минимальная	34	99	0,31
Максимальная	106	208	0,60
Средняя	70	150	0,46
Диапазон колебаний (разница макс.-мин.)	72	109	0,29

*Анализ температуры горячего дутья*

Несмотря на то что наиболее низкая температура купола к концу дутьевого периода была зафиксирована у ВН № 3, его работа на дутье практически не приводит к падению температуры ГД (рис. 9). Более существенно на дутье влияет ВН № 1. В конце периода при его работе на дутье ВН № 1 (розовый) – в паре с ВН-№ 2 (зеленый) температура на дутье снижается с

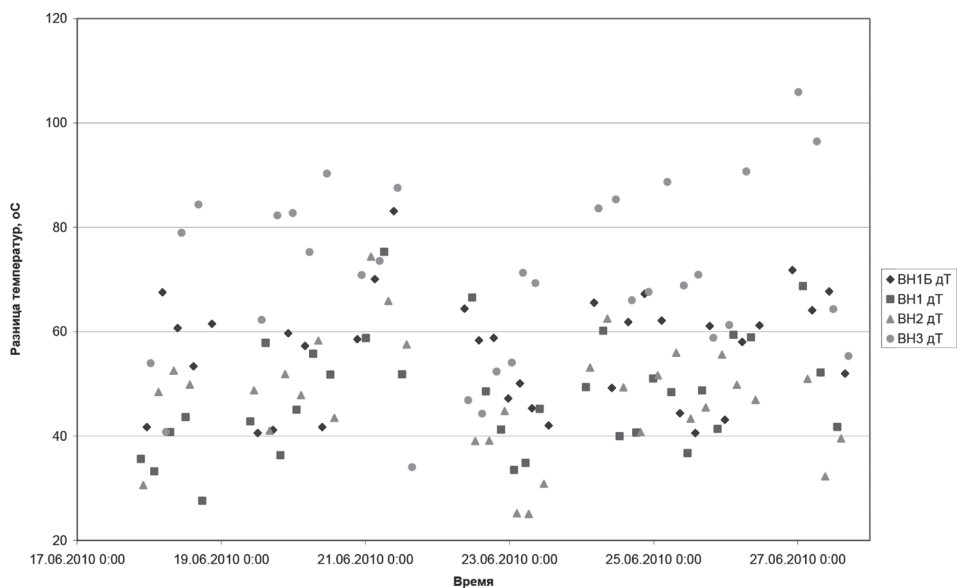


Рис. 8. Разница температур в начале и в конце периода дутья

1133 до 1121 °С, с 1135 до 1112 °С, с 1126 до 1096 °С, с 1139 до 1104 °С, т.е. на 12–35 °С. Возможно, что это связано с паразитными перетоками холодного дутья через неплотности окатов камеры горения, которые поступают напрямую в тракт горячего дутья. Этот поток холодного дутья минует насадку

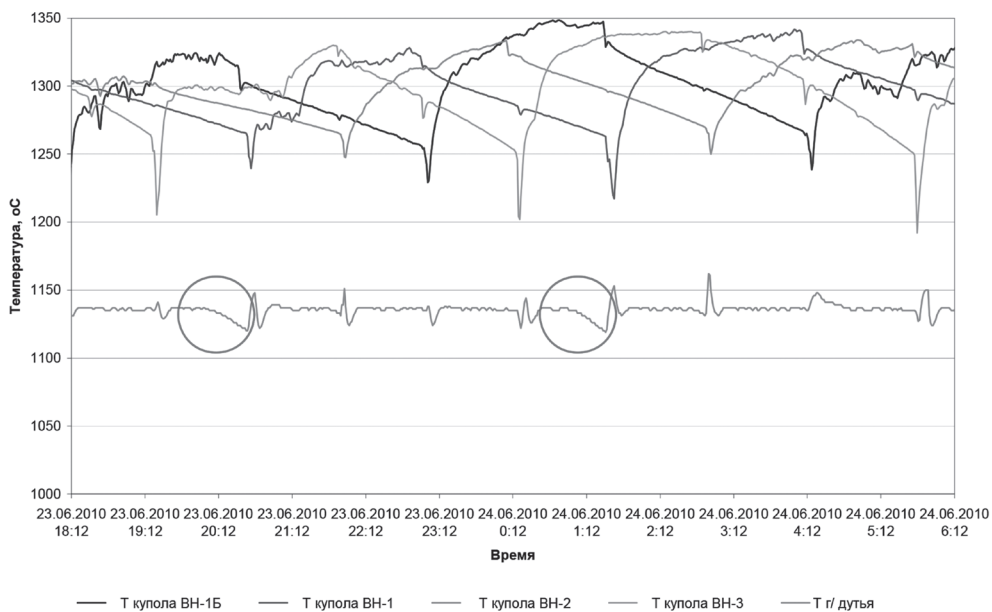


Рис. 9. Температуры купола и горячего дутья

и термопару, расположенную на куполе, поэтому ее показания снижаются незначительно. Основные характеристики горячего дутья за исследуемый период с 17.06.2010 г. по 27.06.2010 г. представлены в табл. 7.

Таблица 7

**Основные характеристики горячего дутья**

Параметр	Температура ГД, °С	Расход дутья, м³/мин
Минимум	988	3164
Максимум	1172	3917
Среднее	1117	3478

В результате проведенного теплотехнического обследования разработаны основные пути повышения эффективности работы доменных ВН ДП № 1 за счет оптимизации теплотехнических режимов работы за счет практической реализации высокоэффективной АСУ ТП с подсистемой ВИОУ-ВН, включающей решение следующих задач:

- максимизации температуры купола в газовый период – в связи с колебаниями химического состава доменного газа и соотношения «газ–воздух»;
- стабилизации соотношения «газ–воздух» в условиях колебания состава газа;
- максимизации температуры горячего дутья путем определения оптимальных температурно-временных режимов работы каждого воздушонагревателя;
- определения оптимального расхода продуктов сгорания и его корректировки в целях достижения предельной температуры в поднасадочном пространстве к концу газового периода;
- косвенные измерения параметров, включая:
- температурные поля в насадке ВН в различных режимах его работы;
- КПД ВН;
- определение доли «коротких замыканий» (вредных перетоков «камера горения-насадка»).

Для этого необходимо реализовать измерение следующих параметров:

- расход воздуха горения, например, с использованием осредняющих пневмометрических трубок, производимых в ОАО «ВНИИМТ», – позволит стабилизировать оптимальное соотношение «газ–воздух» в целях максимизации температуры купола;
- расход холодного дутья на каждый из ВН – измерение данного параметра наряду с общим расходом позволит составлять тепловые балансы для каждого ВН индивидуально и более надежно осуществлять диагностику их работы;
- температура горячего дутья на выходе из ВН (в штуцере ГД);
- давление воздуха перед горелкой;
- давление газа перед горелкой;
- разрежение в борове;
- температура горячего дутья перед смесителем.



Таким образом, результаты обследования работы блока ВН ДП № 1 показали, что в настоящее время имеются значительные резервы повышения температуры горячего дутья и эффективности работы блока ВН, обусловленные:

- отсутствием автоматического регулирования параметров в газовой и дутьевой периоды. Регулирование (стабилизацию) параметров осуществляет оператор;
- большими колебаниями химического состава доменного газа и, соответственно, его калорийности (до 44 %);
- большой разницей температур купола ВН одновременно работающих в газовом периоде, достигающей 40 °С, что является следствием различного коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ ;
- большими колебаниями температур в поднасадочном пространстве в конце газового периода, превышающим 90 °С;
- различным падением температур горячего дутья при работе различных ВН на дутье, что позволяет определять оптимальное время на дутье того или иного ВН для максимизации температуры дутья;
- большим падением температуры горячего дутья (до 12–35 °С), наблюдаемым при работе на дутье ВН № 1, что может быть связано с большей долей паразитных перетоков между насадкой и камерой горения («короткие замыкания»).

Внедрение же высокоэффективной АСУ ТП с подсистемой «Верхний имитационно-оптимизирующий уровень доменных воздуходогревателей», разработанной во ВНИИМТ, позволит оперативно с минимальными затратами увеличить температуру горячего дутья на 30–40 °С, что соответствует годовому экономическому эффекту, получаемому за счет экономии кокса в размере 53–70 млн руб.

### **Выводы**

1. Разработана методика проведения теплотехнического обследования работы блока доменных воздуходогревателей и анализа резервов увеличения температуры горячего дутья.

2. Исследован технологический процесс получения горячего дутья и на его основе разработаны мероприятия по увеличению температуры горячего дутья не менее чем на 30–40 °С, в том числе за счет совершенствования автоматизированной системы управления и внедрения подсистемы оптимального управления, построенной на базе детерминированных математических моделей ВНИИМТ, адаптированных к реальному процессу.

3. Результаты работы использованы при проведении капитального ремонта блока доменных воздуходогревателей ДП № 1 ОАО «Челябинский металлургический комбинат».

### **Список использованных источников**

1. Шкляр Ф.Р. Доменные воздуходогреватели (конструкции, теория, режимы работы) / Шкляр Ф.Р., Малкин В.М., Кашианова С.П., Калугин Я.П., Советкин В.Л. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.